干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

陇中黄土高原丘陵沟壑区不同植被恢复模式下次降雨产流产沙特征

朱燕琴[1]， 赵志斌[2]， 齐广平[1]， 康燕霞[1]， 赵 霞[1]
（1 甘肃农业大学水利水电工程学院，甘肃 兰州 730070；2 甘肃省水利厅水土保持局，甘肃 兰州 730030）

摘 要： 基于甘肃省清水县汤峪河径流小区2015—2017年的观测数据，研究不同植被恢复模式条件下坡面次降雨入渗、产流产沙特征。结果表明：不同植被恢复模式条件下的土壤入渗量与降雨强度呈二次函数关系，存在入渗量达到最大值的临界降雨强度。入渗速率与降雨历时可以用幂函数关系表达，符合考斯恰可夫入渗模型。不同植被恢复模式条件下的产流率在0.003 3～0.003 6 mm·min^{-1}之间，相对裸地的减流率为54%～58%。产流率与降雨强度之间呈二次函数关系（R^2 > 0.88），产流率的主要影响因素是降雨强度。径流含沙量平均值乔灌混合区（3.13 g·L^{-1}）> 灌木林（2.95 g·L^{-1}）> 乔木林（2.79 g·L^{-1}）> 草地（2.58 g·L^{-1}），径流含沙量与降雨强度呈线性递增函数关系。裸地的产沙量显著高于各植被小区（P < 0.05），是各植被小区的43～57倍，各植被小区的减沙率在93%～94%之间，减沙效益高于其减流效益。各植被坡面土壤流失量与降雨侵蚀力呈线性递增函数关系；产流率与侵蚀产沙率之间呈极显著正相关关系（P < 0.01），二者间可采用二次函数关系表达。本研究成果可为黄土高原丘陵沟壑区水土保持优化配置提供理论依据。

关 键 词： 黄土高原丘陵沟壑区；径流场；植被恢复模式；产流产沙

文章编号： 1000-6060(2020)04-0920-08(0920～0927)

陇中黄土高原丘陵沟壑区是黄土高原水土流失最严重的地区，同时又是甘肃省乃至全国最干旱的地区之一，极端脆弱的生态环境特点和严酷的自然条件，导致该区农业生产大起大落，粮食产量低而不稳，成为全国有名的集中连片贫困区[1-2]。因此，恢复重建区域植被，营造良好的生态环境是实现整个地区可持续发展的根本要求[3]。为了治理水土流失，改善生态环境，该地区在20世纪50年代就开展了一系列小流域综合治理工作，90年代又实施了退耕还林还草等生态恢复工程[4-5]。植被通过茎叶对降雨的截留作用减少了降雨到达地面的有效雨量，降低了径流对土壤的侵蚀能量[6]；植被根系能够改良土壤性质，增强土壤的入渗能力，通过其复杂的网状结构提高土壤的抗冲性和抗蚀性，实现了对地表的减水减沙作用[7-8]。通过改善植被是防止水土流失的主要措施。目前，有关植被对产流产沙的影响已有大量研究报道[9-11]，主要集中在不同植被类型水土保持功能的对比研究[12-13]、植被不同结构层次的减流减蚀效应，冠层、枯枝落叶层和根系土壤层在减轻水土流失方面发挥着不同的功能[14-16]，植被盖度则是控制和加速土壤侵蚀的敏感因素。在黄土丘陵区普遍得出：草、灌、林等植被类型在保持水土的作用方面明显高于坡耕地[7-8,16]的结论。

降雨是造成水土流失的源动力[17]，降雨强度、降雨量、降雨历时等均是降雨的特征因子，是影响坡面土壤侵蚀的关键因素[18-19]。在黄土高原丘陵沟壑区植被覆盖度较低，产流量和产沙量与降雨强度呈正相关关系，降雨强度是该区域产流产沙的主要

收稿日期： 2019-09-05； **修订日期：** 2020-05-07
基金项目： 国家重点研发计划项目（2016Yfc0400307）；甘肃农业大学盛彤笙科技创新基金项目（GSAU-STS-1621）；甘肃农业大学青年教师科技创新基金项目（SLXY-QN-2020-03）资助
作者简介： 朱燕琴（1979-），女，甘肃兰州，硕士，讲师，主要从事农业水利工程方面的研究工作. E-mail:zhuyq@gsau.edu.cn
通讯作者： 齐广平（1969-），男，甘肃庆阳，博士，教授，主要从事节水灌溉及农业生态研究. E-mail:qigp@gsau.edu.cn

影响因子[20]。植被对降雨进行了再分配,表现出不同的产流产沙规律,黄土高原丘陵沟壑区常见植物群落的组成物种为沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)等,相关植被类型的水土保持功效已有大量研究报道[15-16],而在诸多的人工群落中,普遍认可可持续发育的只有沙棘和柠条[21-22]。因地制宜地选择植被类型和措施,能够促进该区域水土流失综合治理和生态环境建设。汤峪河径流小区监测点是全国水土保持监测网络2011年在甘肃省新建的8个径流小区之一。径流小区植被种类主要选择三叶草、沙柳、红叶李等,并采用不同的搭配组合构成不同的恢复模式,而目前有关三叶草、沙柳、红叶李等植被类型及其不同恢复模式的产流产沙特征的研究报道相对较少,本研究利用汤峪河径流小区2015—2017年连续3 a测定的降雨及泥沙资料,对不同植被类型及恢复模式的次降雨产流产沙特征进行对比研究,旨在筛选出优良的水土保持植被类型和适宜的植被恢复模式,为今后黄土高原丘陵沟壑区加强生态修复和建立区域水土流失模型提供理论依据和技术支持。

1 研究区概况

甘肃省清水县汤峪河径流小区位于永清镇暖湾村,东距清水县县城8 km(34°42′50″ N,105°15′42″ E),属渭河二级支流汤峪河流域,是甘肃省新建的8个径流小区之一。流域内土壤主要有褐土、黄绵土、红土,质地为粘壤土,植被以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、杨树(*Populus*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、蒿类为主,年日照时数2 076.9 h,≥10 ℃积温2 835 ~ 2 894 ℃,日平均气温8.3 ~ 9.3 ℃,年降水量515 ~ 584 mm,无霜期160 ~ 180 d。共有5个径流观测小区,分别为原坡面区、人工草区、灌木林区、乔木林区、灌乔混合区,小区规格为5 m×20 m(水平投影),小区坡度统一为15°,径流小区具体参数见表1。

2 材料与方法

径流小区降雨观测:采用翻斗式数字雨量计观测一次降雨过程,设定数据采集时间间隔为5 min,记录该时间内收集的雨量,最终计算次雨量和时段降雨强度。

径流小区径流泥沙观测:径流量(m^3)的测定在径流产生后,利用水尺读取各试验小区集流池水深,再根据集流池底面积与水深计算径流总量(m^3)。含沙量($g \cdot L^{-1}$)的测定采用比重瓶法,将池中的泥水充分搅拌均匀,用取样瓶在不同区域采集体积为500 mL的水沙样品3个,过滤后烘干称重,求平均值测得含沙率。植被盖度的测定:每隔15 d采用直接目测法测定。

本研究监测时段为2015年1月 ~ 2017年12月,其间共有11次降雨发生了产流(本研究中将发生产流的降雨称为有效降雨)。按照气象学上的雨量标准对11次有效降雨进行分级,中雨(10 ~ 25 mm)8次、大雨(25 ~ 50 mm)3次、小雨(≤10 mm)未发生产流事件,次降雨量范围10.8 ~ 35.2 mm。中雨和大雨是黄土丘陵沟壑区发生产流的主要降雨类型,这与以往的测定结果相一致[23],次降雨强度0.5 ~ 10.1 $mm \cdot h^{-1}$,降雨历时2.8 ~ 46.1 h。

与模拟试验相比自然降雨事件的降雨历时相对较短、降雨强度相对较小,降雨过程中植被截留、土壤蒸发及填凹水量可近似忽略不计[19]。因此,入渗量采用下式进行计算,$R_i = R - R_u$,R_i为入渗量(mm),R为降雨量(mm),R_u为径流深(mm)。

各植被小区的减流率(%)=(裸坡面产流率 − 各植被坡面产流率)/ 裸坡面产流率×100%。

表1 径流小区参数

Tab. 1 Parameters of runoff treatment

小区编号	坡度 / °	植被恢复模式	植被种类	植被盖度(郁闭度)/ %	林下植被	林下植被盖度 / %
1	15	草地	三叶草	74	−	−
2	15	乔灌混合区	沙柳、红叶李	50	−	−
3	15	裸坡地	−	4	−	−
4	15	灌木林	沙柳	43	−	−
5	15	乔木林	红叶李	30	蒿类、冰草	40

各植被小区的减沙率(%)=(裸坡面土壤流失量－各植被坡面的土壤流失量)/裸坡面的土壤流失量×100%。

降雨侵蚀力(R_e)=E×I_{30},E表示为一次降雨总动能,I_{30}为该次降雨最大30 min雨强。

共计55组有效观测数据。使用SPSS 20.0软件包进行数据处理,Excel 2016软件包绘图。

3 结果与分析

3.1 各小区降雨入渗特征

2015年1月～2017年12月径流小区发生有效降雨共计11次,次降雨强度均较小(0.5～10.1 mm·h⁻¹),各处理次降雨入渗量9.74～34.3 mm。绘出土壤入渗量与降雨强度的散点图(图1)可以看出,土壤入渗量随着降雨强度的增大而增大,它们之间的关系符合二次函数的关系,$R_i=aR_p^2+bR_p+c$ ($P<0.05$),a、b、c均为常数,R_p为降雨强度(mm·h⁻¹),决定系数(R^2)在0.5以上。降雨强度较小时,降雨强度的递增有利于土壤入渗性能的提升,使得入渗水量变大,但是随着降雨强度的持续增大,降雨侵蚀力急剧增大,破坏了土壤的结构,土壤入渗量开始减小,出现了入渗量达到最大值的临界降雨强度。回归曲线的一介导数可表达为临界降雨强度,有植被的坡面临界降雨强度均为11 mm·h⁻¹,各植被坡面的入渗性能未产生明显差异,裸坡的临界降雨强度为12 mm·h⁻¹,不同降雨强度下裸坡地的入渗量小于植被坡面。土壤平均入渗速率(R_v)为土壤的入渗量与降雨历时(t)的比值,由图2可知在降雨初始阶段,有植被的小区入渗速率近似相等,均大于裸坡面,但随着降雨历时的延长与裸坡入渗率的差异逐渐减小,随着降雨的持续,土壤内部孔隙几乎全部被水分占据,土壤中的水无法继续保持快速的流动,各处理的入渗速率在降雨历时20 h时近似相等。回归分析结果表明,土壤入渗速率与降雨历时之间呈幂函数关系,$R_v=a^t-b$,a、b为常数,决定系数(R^2)在0.76以上,较好的符合了考斯恰可夫入渗模型,这与朱燕琴等[24]在黄土高原丘陵沟壑区常见植被类型土壤入渗性能的研究结果相一致。

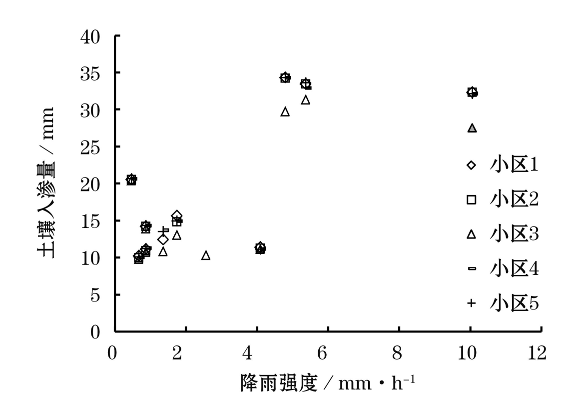


图1 土壤入渗量与降雨强度的散点图

Fig. 1 Scatter plot between soil infiltration amount and rainfall intensity

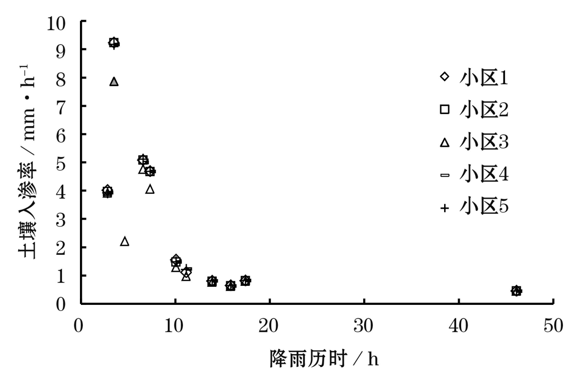


图2 土壤入渗率与降雨历时的散点图

Fig. 2 Scatter plot between infiltration rate and rainfall duration

3.2 小区产流率

由表2产流率平均值统计结果可知,草地、乔木

表2 各小区产流产沙参数的均值比较及减流率和减沙率

Tab. 2 Mean comparison of runoff and sediment parameters, runoff reduction rate and sediment reduction rate

小区	植被	产流率 / mm·min⁻¹	含沙量 / g·L⁻¹	土壤流失量 / t·hm⁻²	减流率 / %	减沙率 / %
1	三叶草	0.003 3±0.004a	2.58±3.16b	0.045±0.094b	58	94
2	沙柳、红叶李	0.003 5±0.004a	3.13±4.15b	0.059±0.123b	56	93
3	–	0.007 9±0.010a	44.40±73.27a	2.558±5.191a	–	–
4	沙柳	0.003 6±0.004a	2.95±3.66b	0.055±0.117b	54	93
5	红叶李	0.003 5±0.004a	2.79±3.44b	0.052±0.110b	56	94

注:表中同列字母不同表示在5%水平差异显著。

林、灌木林和乔灌混合区的产流率基本相同，在0.003 3～0.003 6 mm·min^{-1}之间，裸坡面产流率平均值达到0.007 9 mm·min^{-1}，是有植被坡面产流率的2倍。均值比较结果表明，5个小区的产流率并未产生显著性差异（$P>0.05$）。但是相对裸坡面4种植被恢复模式均发挥了一定的减流效益，各植被坡面的减流率在54%～58%之间。相关分析表明，产流率与降雨强度之间呈极显著正相关关系（$P<0.01$），绘出产流率与降雨强度的散点图（图3），可以看出产流率与降雨强度之间呈递增的变化趋势，随着降雨强度的增大，单位面积单位时间内的产流量呈增大的趋势。回归分析结果表明，产流率（R_r）与雨强（R_p）呈二次函数关系（$R^2>0.88$），说明产流率的88%以上是由降雨强度决定的，降雨强度是产流率的主要影响因素。

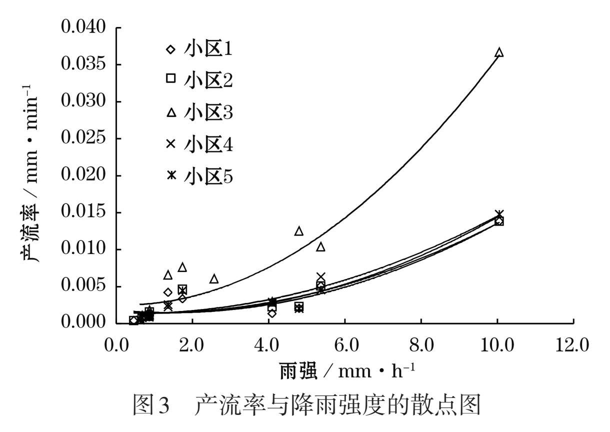


图3　产流率与降雨强度的散点图

Fig. 3　Scatter plot between runoff rate and rainfall intensity

3.3　小区径流含沙量

坡面径流的含沙特征是研究坡面侵蚀产沙的重要内容，含沙量能够说明水流的挟沙能力[24]。从表2统计结果可以看出，径流含沙量平均值乔灌混合区（3.13 g·L^{-1}）＞灌木林（2.95 g·L^{-1}）＞乔木林（2.79 g·L^{-1}）＞草地（2.58 g·L^{-1}）。近地面植被三叶草的盖度最高，径流含沙量最小，乔木林在整个监测期间的郁闭度仅为0.3，但林下分布蒿类、冰草等地被植物，盖度达到40%，有效减小了降雨达到地面的动能，径流含沙量略高于草地。乔灌混交林和灌木林通过冠层的截留作用，减小了降雨的冲力，但由于缺少林下植被形成了植被空层，降雨通过冠层到达地面的过程中汇聚了能量，携出了更多的泥沙，径流含沙量相对较高。因此，在黄土高原丘陵沟壑区近地面植被的建设对减少径流含沙量具有重要的作用，灌木草本层相对林冠层能够更有效地削弱降雨动能的大小[25]。均值比较结果表明（表2），裸坡面的径流含沙量显著高于4种植被恢复模式的径流含沙量（$P<0.05$），是有植被坡面的14～17倍。不同植被恢复模式的减沙效益是显著的，其减沙功效明显高于其减流功效。

降雨动能与降雨强度存在密切的关系，降雨强度越大，则降雨动能越大[26]。对降雨强度与径流含沙量进行相关分析，结果表明降雨强度与径流含沙量呈极显著正相关关系（$P<0.01$），相关系数在0.78以上。绘出径流含沙量与降雨强度的散点图可以看出（图4），随着降雨强度的增大，径流含沙量增大，二者间呈线性递增函数关系，斜率a值能够反应含沙量随降雨强度的增速，裸坡地的a值为19.6，分别是各植被坡面的19～23倍，a值由大到小为裸坡面＞乔灌混合区＞灌木林＞乔木林＞草地，这与径流含沙量的排序是一致的，4种植被恢复模式草地和乔木林有效降低了降雨动能，产沙强度最小，灌木林次之，乔灌混交林的产沙强度最大。

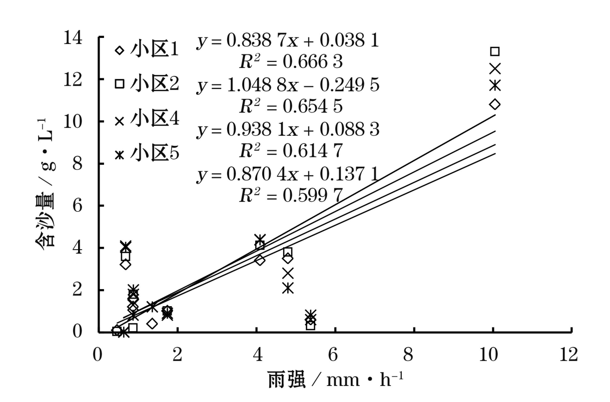


图4　含沙量与降雨强度的散点图及其拟合曲线

Fig. 4　Scatter plot and fitting curve between sediment concentration and rainfall intensity

3.4　小区土壤流失量

降雨侵蚀力是降雨引起土壤潜在侵蚀的能力，能够反映降雨特性对土壤侵蚀的能力，是建立通用土壤流失方程USLE的最基本因子之一[27]。在整个监测时段内发生有效降雨11次，按照降雨侵蚀力可将11次降雨分为4类，0～50、50～100、100～200、＞200 MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1}。由表3可知，4类侵蚀性降雨分别产流产沙7次、2次、1次和1次，随着降雨侵蚀力的增大产流产沙频次减少。连续3 a测定结果表明，＞200 MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1}的侵蚀性降雨次

数仅1次，但是产沙量最多，占累积产沙总量的70%以上，0~50 MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1}之间的降雨侵蚀力小，但发生的频次较高，累积产沙量占总产沙量的20%~24%，因此黄土高原丘陵沟壑区不同植被恢复模式下的产沙量主要由发生频次少的高侵蚀性降雨所形成，侵蚀力小的降雨次产沙量虽小但发生的频率高，其累积产沙量对总产沙量具有一定的贡献。

表3　不同降雨侵蚀力条件下的土壤流失量 / t·hm^{-2}

Tab. 3　Soil loss amount of different rainfall erosivity classifications / t·hm^{-2}

小区	降雨侵蚀力 / MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1}			
	0~50	50~100	100~200	>200
1	0.089	0.012	0.032	0.313
2	0.101	0.006	0.038	0.386
3	1.633	1.058	9.867	15.577
4	0.119	0.015	0.025	0.388
5	0.123	0.014	0.019	0.363

通用土壤流失方程，是一个定量预报农耕地或草地坡面年平均土壤流失量的经验性土壤流失预报方程。其数学表达式为：

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \tag{1}$$

式中：A表示为年平均土壤流失量，R为降雨侵蚀力，K为土壤可蚀性，L、S分别表示坡长和坡度，C为植被覆盖和经营管理因子，P为水土保持措施因子。在特定的试验小区坡度、坡长和土壤性质是一定的，当盖度和水土保持措施基本相同的情况下，土壤流失量就只与降雨侵蚀力相关。本研究中次降雨土壤流失量随着降雨侵蚀力的增大而增大（图5），土壤流失量与降雨侵蚀力表现为递增的变化规律，草地、灌木林、乔木林和乔灌混交林的土壤流失量与降雨侵蚀力均可采用线性函数关系表达：$S_L = aR_e + b$，S_L为土壤流失量，a、b为方程拟合参数（$P<0.01$），决定系数（R^2）在0.73以上。

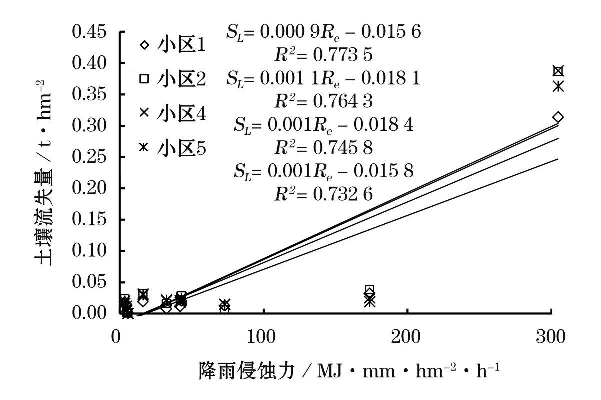


图5　土壤流失量与降雨侵蚀力的散点图及拟合曲线

Fig. 5　Scatter plot and fitting curve between soil loss and rainfall erosivity

土壤流失量的均值比较结果表明（表2），裸地的土壤流失量最大（2.558 t·hm^{-2}），分别是各植被小区的43~57倍，裸地的产沙量显著高于植被小区（$P<0.05$），相对裸地各植被小区的减沙率在93%~94%之间（表2），减沙效益非常显著。4个植被小区之间的产沙量不同但并未产生显著性差异（$P>0.05$），具体表现为灌木林>乔灌混合区>乔木林>草地，在建植的初期阶段草地的盖度高抗侵蚀能力最强，乔木林下分布地被植物抗侵蚀能力次之，乔灌混交林和灌木林缺少林下植被抗侵蚀能力相对较弱。

3.5　产流产沙的关系分析

作为土壤可蚀性的一个指标，通常认为产流产沙关系在净分离条件下是线性的，在沉积条件下是二次回归式[28]。本文结果显示（图6），在自然降雨条件下各植被坡面的产流率与侵蚀产沙率之间呈极显著正相关关系（$P<0.01$），二者间可采用二次函数关系表达，$E_r = aR_r^2 + bR_r + c$（$P<0.01$），a、b、c均为常数，E_r为产沙率（g·m^{-2}·min^{-1}），R_r为产流率（mm·min^{-1}），决定系数（R^2）在0.98以上，这与张冠华等[29]在模拟降雨条件下的研究结果有所不同。

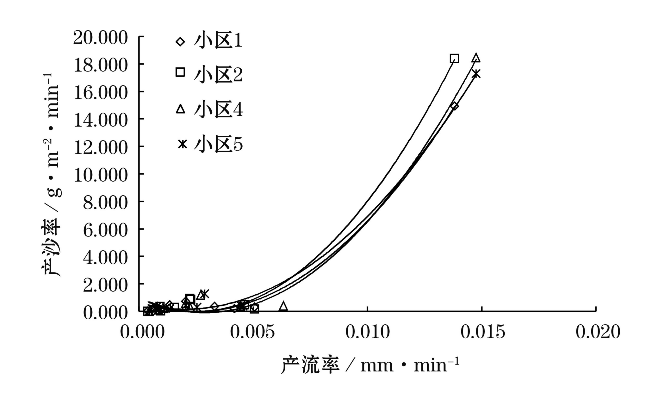


图6　产流率与产沙率的散点图及其拟合曲线

Fig. 6　Scatter plot and fitting curve between runoff rate and rate of sediment yield

4　结　论

（1）降雨坡面径流为超渗产流，当降雨强度大

于土壤入渗率,地表产生径流。土壤入渗量与降雨强度之间符合二次函数的关系,在降雨强度较小时入渗量随着降雨强度的增大而增大,但增大到一定的程度时,则入渗量开始减小,即存在入渗量达到最大值的临界降雨强度。随着降雨历时的延长,入渗率逐渐较小,入渗速率与降雨历时之间呈幂函数关系,较好的符合了考斯恰可夫入渗模型。

(2) 裸坡面的产流率是有植被坡面产流率的2倍。草地、乔木林、灌木林和乔灌混合区的产流率基本保持在0.003 3~0.003 6 $mm\cdot min^{-1}$之间,其减流效益是明显的。各植被坡面的产流率与降雨强度之间呈二次函数关系,R^2在0.88以上,产流率的主要影响因素是降雨强度。

(3)裸坡面的径流含沙量显著高于4种植被恢复模式的径流含沙量($P<0.5$),是有植被坡面的14~17倍。径流含沙量平均值乔灌混合区(3.13 $g\cdot L^{-1}$)>灌木林(2.95 $g\cdot L^{-1}$)>乔木林(2.79 $g\cdot L^{-1}$)>草地(2.58 $g\cdot L^{-1}$),不同植被恢复模式的减沙效益是显著的。4种植被恢复模式中,草地和乔木林有效降低了降雨动能,产沙强度最小,灌木林次之,乔灌混交林的产沙强度最大。草地、灌木林、乔木林和乔灌混交林的产沙量与降雨侵蚀力均呈线性函数关系;产流率与侵蚀产沙率之间呈二次函数关系。

(4)不同的植被类型及其搭配组合控制水土流失的效益是不同的,植被枝叶的蔓延和根系的固结是一个循序渐进的过程,在不同的阶段植被的产流产沙规律有所不同,本研究主要针对建设初期不同植被恢复模式的产流产沙特征和减流减沙效益进行了对比分析,在今后的工作中还需要进行长期定位观测,对不同阶段不同植被恢复模式的水土保持功效进行全面的分析和研究。

参考文献(References)

[1] 罗珠珠,牛伊宁,李玲玲,等. 黄土高原丘陵沟壑区土壤物理性质对苜蓿种植年限的响应[J]. 中国生态农业学报,2016,24(11):1500-1507.[LUO Zhuzhu,NIU Yining,LI Lingling,et al. Response of soil physical properties to alfalfa growth years in the western Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2016,24(11):1500-1507.]

[2] 师尚礼,曹文侠,尹国丽,等. 陇中干旱区草粮兼顾型生态农业模式构建[J]. 草原与草坪,2017,37(5):1-7.[SHI Shangli,CAO Wenxia,YIN Guoli,et al. Construction of eco-agriculture model based on integrated development of forage and crop in Longzhong semi-arid regions[J]. Grassland and Turf,2017,37(5):1-7.]

[3] 张志强,孙成权,王学定,等. 陇中黄土高原丘陵区生态建设与可持续发展[J]. 水土保持通报,1999,19(5):54-58.[ZHANG Zhiqiang,SUN Chengquan,WANG Xueding,et al. On ecological construction and sustainable development of Gansu Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,1999,19(5):54-58.]

[4] 陶宇. 黄土丘陵区植物群落结构与径流输沙的关系[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.[TAO Yu. The relationship between plant community structure and soil erosion in loess hilly area[D]. Yangling:Northwest Agriculture and Forestry University,2018.]

[5] 李建华,袁利,于兴修,等. 生态清洁小流域建设现状与研究展望[J]. 中国水土保持,2012,(6):11-13.[LI Jianhua,YUAN Li,YU Xingxiu,et al. Present situation and research prospect of ecological clean small watershed construction[J]. Soil and Water Conservation in China,2012,(6):11-13.]

[6] 高光耀,傅伯杰,吕一河,等. 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展[J]. 生态学报,2013,33(1):12-22.[GAO Guangyao,FU Bojie,LV Yihe,et al. The effect of land cover pattern on hillslope soil and water loss in the arid and semi-arid region:A review[J]. Acta Ecologica Sinica,2013,33(1):12-22.]

[7] 刘定辉,李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J]. 水土保持学报,2003,17(3):34-37,117.[LIU Dinghui,LI Yong. Mechanism of plant roots improving resistance of soil to concentrated flow frosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2003,17(3):34-37,117.]

[8] 张琪琳,王占礼,王栋栋,等. 黄土高原草地植被对土壤侵蚀影响研究进展[J]. 地球科学进展,2017,32(10):1093-1101.[ZHANG Qilin,WANG Zhanli,WANG Dongdong,et al. Advances in researches of the effects of grassland vegetation on soil erosion in Loess Plateau[J]. Advances in Earth Science,2017,32(10):1093-1101.]

[9] 陈众,田丰,董俊. 不同土地利用方式对丘陵山区坡面侵蚀产沙量的影响[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(1):186-192.[CHEN Zhong,TIAN Feng,DONG Jun. The slope erosion sediment yield under different land use types in hilly area of Anhui Province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2015,29(1):186-192.]

[10] 王全九,赵光旭,刘艳丽,等. 植被类型对黄土坡地产流产沙及氮磷流失的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(14):195-201.[WANG Quanjiu,ZHAO Guangxu,LIU Yanli,et al. Effects of vegetation types on yield of runoff and sediment,loss of nitrogen and phosphorus along loess slope land[J]. Journal of Agricultural Engineering,2016,32(14):195-201.]

[11] VERHE A,HASHOLT B. Soil erosion Denmark:Processes and politics[J]. Environmental Science and Policy,2003,6(1):35-50.

[12] 艾宁,魏天兴,朱清科. 陕北黄土高原不同植被类型下降雨对坡面径流侵蚀产沙的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(2):26-30.[AI Ning,WEI Tianxing,ZHU Qingke. The effect of

rainfall for runoff-erosion-sediment yield under the different vegetation types in Loess Plateau of Northern Shaanxi Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(2): 26 – 30.]

[13] 徐佳,刘普灵,邓瑞芬,等. 黄土坡面不同植被恢复阶段的减流减沙效益研究[J]. 地理科学,2012,32(11):1391 – 1396. [XU Jia, LIU Puling, DENG Ruifen, et al. Runoff and sediment reduction in the different stages of vegetation restoration on a loess slope [J].Scientia Geographica Sinica, 2012, 32 (11): 1391 – 1396.]

[14] 杨永辉,赵世伟,雷廷武,等. 宁南黄土丘陵区不同植被下土壤入渗性能[J]. 应用生态学报,2008,19(5):1040 – 1045. [YANG Yonghui, ZHAO Shiwei, LEI Tingwu, et al. Soil infiltration capacity under different vegetations in southern Ningxia loess hilly region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(5): 1040 – 1045.]

[15] 陈三雄,沈义. 黄浦江源头区主要植被类型土壤入渗特征及模拟分析[J]. 水土保持研究,2016,22(6):59 – 63. [CHEN Sanxiong, SHEN Yi. Simulation analysis on soil infiltration characteristics under main vegetation types in Huangpu River Source Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 22(6): 59 – 63.]

[16] MOHR C, BRONSTERT A, HUBER A, et al. Influence of different forest management practices and vegetation cover on runoff generation and sediment flux in the coastal range of Southern Chile[J]. Egu, 2010, 57(4): 209 – 213.

[17] 黄俊,亢庆,金平伟,等. 南方红壤区坡面次降雨产流产沙特征[J]. 中国水土保持科学,2016,14(2):23 – 30. [HUANG Jun, KANG Qing, JIN Pingwei, et al. Characteristics of slope runoff and sediment yield under individual rainfall events in southern red soil region [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2016, 14 (2): 23 – 30.]

[18] 寇馨月,黄俊,姜学兵,等. 不同下垫面径流小区次降雨对产流产沙的影响[J]. 水土保持通报,2017,37(2):27 – 31. [KOU Xinyue, HUANG Jun, JIANG Xuebing, et al. Effects of rainfall on runoff and sediment under different underlying surfaces of runoff plots[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2): 27 – 31.]

[19] FANG N F, SHI Z H, LI L, et al. The effects of rainfall regimes and land use changes on runoff and soil loss in a small mountainous watershed[J]. Catena, 2012, 99(4): 1 – 8.

[20] 琚彤军,刘普灵,徐学选,等. 不同次降雨条件对黄土区主要地类水沙动态过程的影响及其机理研究[J]. 泥沙研究,2007,32(4):65 – 71. [JU Tongjun, LIU Puling, XU Xueyuan, et al. Experimental study on runoff and sediment process in primary-lands in loess hilly regions under different rainfall conditions [J]. Journal of Sediment Research, 2007, 32(4): 65 – 71.]

[21] 张文辉,刘国彬. 黄土高原植被恢复与建设策略[J]. 中国水土保持科学,2009,14(2):24 – 27. [ZHANG Wenhui, LIU Guobin. Vegetation rehabilitation and building of Loess Plateau[J]. Soil and Water Conservation in China, 2009, 14(2): 24 – 27.]

[22] 赵珩钪,曹斌挺,焦菊英. 黄土丘陵沟壑区退耕坡地不同植物群落的土壤侵蚀特征[J]. 中国水土保持科学,2017,15(3):105 – 113. [ZHAO Hengkang, CAO Binting, JIAO Juying. Characteristics of soil erosion of different plant communities converted from slope cropland in the hilly-gully region of the Loess Plateau [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017, 15(3): 105 – 113.]

[23] 朱燕琴,赵志斌,齐广平. 黄土丘陵区植被类型和降雨对坡面侵蚀产沙的影响[J]. 水土保持学报,2019,33(2):9 – 16. [ZHU Yanqin, ZHAO Zhibin, QI Guangping. Effects of vegetation types and rainfall regimes on slope erosion and sediment yield in loess hilly and gully region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(2): 9 – 16.]

[24] 朱燕琴,赵志斌,齐广平,等. 黄土丘陵区不同植被类型次降雨产流产沙特征[J]. 草地学报,2019,27(1):28 – 34. [ZHU Yanqin, ZHAO Zhibin, QI Guangping, et al. Characteristics of slope runoff and sediment of different vegetation types under individual rainfall events in loess hilly and gully region[J]. Acta Agrectia Sinica, 2019, 27(1): 28 – 34.]

[25] 赵玉涛,余新晓,张志强. 长江上游亚高山峨眉冷杉林地被物层界面水分传输规律研究[J]. 水土保持学报,2002,(3):118 – 121. [ZHAO Yutao, YU Xinxiao, ZHANG Zhiqiang. Study on water transport in interface of litters and moss in *Abies fabri* forest of upper reach of Yangtze River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, (3): 118 – 121.]

[26] 薛燕妮,徐向舟,王冉冉,等. 人工模拟降雨的能量相似及其实现[J]. 中国水土保持科学,2007,5(6):102 – 105. [XUE Yanni, XU Xiangzhou, WANG Ranran, et al. Principle and method to simulate rainfall with the similar kinetic energy[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(6): 102 – 105.]

[27] 赖成光,陈晓宏,王兆礼,等. 珠江流域1960—2012年降雨侵蚀力时空变化特征[J].农业工程学报,2015,31(8):159 – 167. [LAI Chengguang, CHEN Xiaohong, WANG Zhaoli, et al. Spatial and temporal variations of rainfall erosivity on Pearl River Basin during 1960—2012[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(8): 159 – 167.]

[28] BENIK S R, WILSON B N, BIESBOER D D, et al. Performance of erosion control products on a highway embankment [J]. Transaction of the ASAE, 2003, 46(4): 1113 – 1119.

[29] 张冠华,程冬兵,张平仓,等. 紫鹊界梯田区坡面产流产沙特征的模拟试验研究[J]. 水土保持通报,2013,33(6):9 – 12. [ZHANG Guanhua, CHENG Dongbing , ZHANG Pingcang, et al. Runoff and sediment yield characteristics on slopes in Ziquejie terrace area under simulated rainfall[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(6): 9 – 12.]

Characteristics of slope runoff and sediment of different vegetation restoration patterns under individual rainfall events in hilly and gully loess region in middle Gansu Province

ZHU Yan-qin[1], ZHAO Zhi-bin[2], QI Guang-ping[1], KANG Yan-xia[1], ZHAO-xia[1]

(1 *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering*, *Gansu Agricultural University*, *Lanzhou* 730070, *Gansu*, *China*;
2 *Soil and Water Conservation Bureau*, *Gansu Provincial Water Resources Department*, *Lanzhou* 730030, *Gansu*, *China*)

Abstract: Observations of rainfall infiltration, runoff, and sediment of different vegetation restoration patterns were made at the Tangyuhe runoff plot in Qingshui County, Gansu Province, China from 2015 to 2017. This runoff plot contains complex arbor and bush land, bush forest, arbor forest, and grassland. Our results show that the relationship between the amount of soil infiltration for different vegetation restoration patterns and rainfall intensity followed a quadratic function, as critical rainfall intensity produced the largest infiltration amount. Meanwhile, the relation between the infiltration rate and rainfall duration can be described using the power function, which coincided with the Kostiakov infiltration model. The runoff rate of different vegetation restoration patterns ranged from 0.033 $cm \cdot min^{-1}$ to 0.036 $cm \cdot min^{-1}$. In contrast, bare land had a runoff rate of 0.079 $cm \cdot min^{-1}$. The runoff reduction rate of different vegetation restoration patterns was approximately 54% to 58% compared with bare land. The relation between the runoff rate and rainfall intensity can be expressed as a quadratic function ($R^2 > 0.88$), which was induced primarily by rainfall intensity. The order, from highest to lowest, of average sediment concentration was as follows: complex arbor and bush land (3.13 $g \cdot L^{-1}$) > bush forest (2.95 $g \cdot L^{-1}$) > arbor forest (2.79 $g \cdot L^{-1}$) > grassland (2.58 $g \cdot L^{-1}$). The relation between sediment concentration and rainfall intensity can be expressed as a linear increasing function. The sediment yield of bare land reached 2.558 $t \cdot hm^{-2}$, which is 43 to 57 times higher than that of vegetation plots ($P < 0.05$). The sediment reduction rate of each vegetation plot was between 93% and 94%, and the benefit of sediment reduction was greater than that of runoff reduction. The relationship between soil loss and rainfall erosivity can be expressed as a linear increasing function, while the relationship between runoff rate and rate of sediment yield displayed a very significant positive correlation ($P < 0.01$), which can be stated as a quadratic function. These results are relevant for optimizing the configuration of water and soil conservation in the loess hilly regions and gully regions.

Key words: hilly and gully loess region; runoff plot; vegetation restoration pattern; runoff and sediment